


**NANOTECNOLOGIA APLICADA À FARMACOLOGIA: AVANÇOS NO
DESENVOLVIMENTO DE FÁRMACOS PARA TERAPIAS DE PRECISÃO**

**NANOTECHNOLOGY APPLIED TO PHARMACOLOGY: ADVANCES IN THE
DEVELOPMENT OF DRUGS FOR PRECISION THERAPIES**

**NANOTECNOLOGÍA APLICADA A LA FARMACOLOGÍA: AVANCES EN EL
DESARROLLO DE FÁRMACOS PARA TERAPIAS DE PRECISIÓN**

 <https://doi.org/10.56238/arev8n5-007>

Data de submissão: 05/04/2026

Data de publicação: 05/05/2026

Jennifer Nascimento da Silva

Doutoranda em Biociência e Saúde

Instituição: Universidade Tiradentes (UNIT)

E-mail: enf.jennifernascimento@outlook.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2471301220200705>

Ronaldo Pereira da Silva

Graduado em Enfermagem

Instituição: Centro Universitário Maurício de Nassau (UNINASSAU)

E-mail: naldopsm@gmail.com

Ismael Rodrigues da Silva

Graduando em Farmácia

Instituição: Centro Universitário Leonardo da Vinci (UNIASSELVI)

E-mail: ismaelrodriguesir4@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-8806-6643>

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0185422798669960>

Tiago Oliveira da Silva

Mestrando em Ciências da Saúde

Instituição: Instituto Integralize (INTEGRALIZE)

E-mail: tiagoowem@hotmail.com

Gabriel Lopes Madeira Nascimento

Pós-Graduado em Saúde Coletiva

Instituição: Instituto de Ciência, Tecnologia e Qualidade Industrial (ICTQ)

E-mail: gabriellopesmadeira@hotmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-5020-040X>

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/2410695991606644>

Daniel Gomes Fialho

Graduado em Medicina

Instituição: Universidade de Mogi das Cruzes (UMC)

E-mail: danfialho@hotmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-2249-0658>

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0852943693676235>

Laura Leme de Araújo Rodrigues da Silva

Graduada em Medicina

Instituição: Universidade Santo Amaro (UNISA)

E-mail: lauraleme@hotmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-0379-3954>

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/3303555869764693>

Anderson Fernandes de Carvalho Farias

Mestre Internacional em Medicina

Instituição: Esneca Business School (ESNECA)

E-mail: andersonfercalho@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4326-9689>

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/3357217652638543>

RESUMO

A nanotecnologia aplicada à farmacologia tem emergido como uma estratégia inovadora no desenvolvimento de fármacos voltados às terapias de precisão, promovendo avanços significativos na eficácia, segurança e individualização dos tratamentos. Este estudo teve como objetivo analisar os principais avanços da nanotecnologia no desenvolvimento de fármacos para terapias de precisão, destacando suas aplicações, benefícios e desafios. Trata-se de uma revisão de literatura, de caráter qualitativo, realizada nas bases de dados PubMed, Scopus, MEDLINE e SciELO, contemplando estudos publicados entre 2022 e 2026, nos idiomas português e inglês. Os resultados evidenciaram que os sistemas nanoestruturados possibilitam maior seletividade na entrega de fármacos, atuando diretamente em alvos moleculares específicos e reduzindo efeitos adversos sistêmicos. Destacam-se ainda os avanços em sistemas inteligentes de liberação controlada, terapias combinadas, nanotecnologia epigenética e integração com a farmacogenômica, que ampliam as possibilidades de intervenções personalizadas. Além disso, verificou-se a aplicação de nanodispositivos no diagnóstico e monitoramento terapêutico, contribuindo para maior precisão clínica. Contudo, persistem desafios relacionados à segurança, toxicidade, impacto ambiental e regulamentação, que ainda limitam a ampla aplicação dessas tecnologias na prática clínica. Conclui-se que a nanotecnologia representa um marco na transformação da farmacologia contemporânea, ao possibilitar o desenvolvimento de terapias mais eficazes, seguras e individualizadas. Entretanto, torna-se essencial o avanço de pesquisas clínicas e regulatórias que viabilizem sua implementação em larga escala, consolidando seu papel na medicina de precisão.

Palavras-chave: Farmacologia. Nanotecnologia. Sistemas de Liberação de Fármacos. Terapia de Precisão. Tratamento Personalizado.

ABSTRACT

Nanotechnology applied to pharmacology has emerged as an innovative strategy in the development of drugs for precision therapies, promoting significant advances in the efficacy, safety, and individualization of treatments. This study aimed to analyze the main advances in nanotechnology in the development of drugs for precision therapies, highlighting its applications, benefits, and challenges. This is a qualitative literature review conducted in the PubMed, Scopus, MEDLINE, and SciELO databases, encompassing studies published between 2022 and 2026, in Portuguese and English. The results showed that nanostructured systems allow for greater selectivity in drug delivery, acting directly on specific molecular targets and reducing systemic adverse effects. Advances in intelligent controlled-release systems, combined therapies, epigenetic nanotechnology, and integration with pharmacogenomics are also highlighted, expanding the possibilities for personalized

interventions. Furthermore, the application of nanodevices in diagnostic and therapeutic monitoring has been verified, contributing to greater clinical precision. However, challenges related to safety, toxicity, environmental impact, and regulation persist, still limiting the widespread application of these technologies in clinical practice. It is concluded that nanotechnology represents a milestone in the transformation of contemporary pharmacology, enabling the development of more effective, safe, and individualized therapies. However, it is essential to advance clinical and regulatory research to enable its large-scale implementation, consolidating its role in precision medicine.

Keywords: Pharmacology. Nanotechnology. Drug Delivery Systems. Precision Therapy. Personalized Treatment.

RESUMEN

La nanotecnología aplicada a la farmacología ha surgido como una estrategia innovadora en el desarrollo de fármacos para terapias de precisión, impulsando avances significativos en la eficacia, seguridad e individualización de los tratamientos. Este estudio tuvo como objetivo analizar los principales avances en nanotecnología en el desarrollo de fármacos para terapias de precisión, destacando sus aplicaciones, beneficios y desafíos. Se trata de una revisión cualitativa de la literatura realizada en las bases de datos PubMed, Scopus, MEDLINE y SciELO, que abarca estudios publicados entre 2022 y 2026, en portugués e inglés. Los resultados mostraron que los sistemas nanoestructurados permiten una mayor selectividad en la administración de fármacos, actuando directamente sobre dianas moleculares específicas y reduciendo los efectos adversos sistémicos. También se destacan los avances en sistemas inteligentes de liberación controlada, terapias combinadas, nanotecnología epigenética e integración con la farmacogenómica, ampliando las posibilidades de intervenciones personalizadas. Además, se ha verificado la aplicación de nanodispositivos en el monitoreo diagnóstico y terapéutico, contribuyendo a una mayor precisión clínica. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la seguridad, la toxicidad, el impacto ambiental y la regulación, lo que aún limita la aplicación generalizada de estas tecnologías en la práctica clínica. Se concluye que la nanotecnología representa un hito en la transformación de la farmacología contemporánea, permitiendo el desarrollo de terapias más eficaces, seguras e individualizadas. Sin embargo, es fundamental impulsar la investigación clínica y regulatoria para posibilitar su implementación a gran escala y consolidar su papel en la medicina de precisión.

Palabras clave: Farmacología. Nanotecnología. Sistemas de Administración de Fármacos. Terapia de Precisión. Tratamiento Personalizado.

1 INTRODUÇÃO

A nanotecnologia tem emergido como uma das áreas mais inovadoras no campo da farmacologia contemporânea, promovendo transformações significativas no desenvolvimento de fármacos e na condução de terapias mais eficazes e seguras. Ao possibilitar a manipulação de materiais em escala nanométrica, essa abordagem favorece a criação de sistemas inteligentes capazes de interagir diretamente com estruturas celulares e moleculares específicas, ampliando o potencial das terapias de precisão. Nesse contexto, a aplicação da nanotecnologia na área da saúde tem se destacado especialmente na oncologia, onde a complexidade das doenças exige estratégias terapêuticas altamente direcionadas (Tantray *et al.*, 2025).

Os avanços recentes demonstram que sistemas baseados em nanotecnologia são capazes de superar limitações clássicas da farmacoterapia convencional, como baixa biodisponibilidade, distribuição não específica e efeitos adversos sistêmicos. Tecnologias inovadoras, como a entrega intracelular de anticorpos mediada por nanopartículas, têm mostrado resultados promissores no tratamento de tumores com mutações específicas, como aqueles associados ao gene KRAS, evidenciando a precisão e eficácia dessas abordagens (López-Estévez *et al.*, 2024). Além disso, o desenvolvimento de dispositivos biomédicos nanoestruturados tem contribuído tanto para o diagnóstico precoce quanto para o monitoramento terapêutico, consolidando a integração entre diagnóstico e tratamento.

Outro aspecto relevante refere-se à capacidade da nanotecnologia em modular processos celulares fundamentais envolvidos na progressão tumoral. Estratégias terapêuticas baseadas na indução de ferroptose, na regulação da autofagia e na modulação da mitofagia têm ampliado as possibilidades de tratamento, especialmente em casos de resistência aos métodos tradicionais (Chen *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2025). Essas abordagens evidenciam o potencial da nanotecnologia em atuar de forma multifuncional, interferindo em diferentes vias biológicas de maneira simultânea e sinérgica.

Paralelamente, a integração entre nanotecnologia e farmacogenômica tem impulsionado o avanço da medicina personalizada, permitindo o desenvolvimento de terapias adaptadas ao perfil genético individual dos pacientes. Essa convergência tecnológica possibilita maior precisão na escolha e na administração dos fármacos, promovendo melhores desfechos clínicos e redução de efeitos adversos (Tiwari *et al.*, 2025). Ademais, o uso de ferramentas computacionais associadas à nanotecnologia tem favorecido a identificação de combinações terapêuticas mais eficazes, potencializando o efeito dos tratamentos e contribuindo para a otimização das estratégias clínicas (Ninh *et al.*, 2023).

Outras abordagens emergentes incluem a aplicação da nanotecnologia em terapias epigenéticas e combinadas, bem como sua associação com técnicas como hipertermia e uso de células progenitoras, ampliando o espectro de atuação no combate ao câncer (Ahmad *et al.*, 2025; Smadja; Lellouch, 2025). Além disso, o desenvolvimento de nanotecnologias sustentáveis, como a nanotecnologia verde, tem sido explorado com o intuito de reduzir impactos ambientais e melhorar a biocompatibilidade dos sistemas terapêuticos (Zahra; Abrahamse; George, 2024).

Apesar dos avanços expressivos, ainda persistem desafios relacionados à segurança, toxicidade e impactos ambientais associados ao uso de nanomateriais, o que reforça a necessidade de estudos mais aprofundados e regulamentações específicas para sua aplicação clínica (Ma *et al.*, 2024). Nesse sentido, torna-se fundamental a realização de pesquisas que avaliem não apenas a eficácia, mas também os riscos envolvidos, garantindo a utilização segura dessas tecnologias.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo analisar os avanços da nanotecnologia aplicada à farmacologia no desenvolvimento de fármacos para terapias de precisão, destacando suas principais aplicações, mecanismos de ação, benefícios e desafios, com ênfase na sua contribuição para a inovação terapêutica e para a consolidação da medicina personalizada.

1.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A incorporação da nanotecnologia à farmacologia contemporânea fundamenta-se na capacidade de manipulação de materiais em escala nanométrica, permitindo interações altamente específicas com estruturas biológicas. Nesse contexto, a medicina de precisão emerge como um campo diretamente beneficiado, uma vez que a integração entre biomarcadores e sistemas nanoestruturados possibilita intervenções terapêuticas mais direcionadas e individualizadas. Conforme destaca Yadollahpour (2021), a associação entre nanotecnologia e biomarcadores amplia significativamente a acurácia diagnóstica e terapêutica, contribuindo para a identificação precoce de doenças e para a seleção de estratégias mais eficazes de tratamento.

No âmbito dos sistemas de liberação de fármacos, observa-se uma evolução significativa dos modelos convencionais para plataformas inteligentes, capazes de controlar a liberação de agentes terapêuticos de forma espaço-temporal. Adepu e Ramakrishna (2021) ressaltam que os sistemas de liberação controlada têm como principal objetivo otimizar a concentração do fármaco no local de ação, reduzindo efeitos colaterais e melhorando a adesão ao tratamento. Essa evolução tem sido impulsionada pelo desenvolvimento de nanomateriais com propriedades físico-químicas ajustáveis, que permitem maior estabilidade, biocompatibilidade e eficiência terapêutica.

A emergência dos sistemas responsivos a estímulos representa um avanço relevante nesse cenário. Segundo Kallepalli *et al.* (2025), esses sistemas são projetados para responder a condições específicas do microambiente biológico, como variações de pH, temperatura e presença de enzimas, promovendo a liberação seletiva do fármaco apenas no local desejado. Essa característica é particularmente relevante no tratamento de doenças como o câncer, onde a heterogeneidade tumoral exige abordagens terapêuticas altamente adaptativas.

Adicionalmente, o desenvolvimento de sistemas inteligentes voltados à regulação do metabolismo tumoral tem ampliado as possibilidades terapêuticas. Li, Sun e Jiang (2024) destacam que a utilização de nanossistemas capazes de interferir em vias metabólicas específicas contribui para a inibição do crescimento tumoral e para a potencialização de terapias combinadas. Nesse sentido, a nanotecnologia não apenas atua como veículo de entrega, mas também como moduladora de processos biológicos fundamentais.

No campo da oncologia, a aplicação de nanomedicina inteligente tem demonstrado avanços expressivos. Cai *et al.* (2025) enfatizam que o uso de diferentes tipos de nanopartículas em terapias para osteossarcoma evidencia a versatilidade dessas tecnologias, permitindo desde a entrega direcionada de fármacos até a modulação de respostas celulares. De forma complementar, Wang, Zhao e Nie (2023) destacam que os nanomateriais inteligentes apresentam potencial para superar mecanismos de resistência tumoral, um dos principais desafios no tratamento do câncer.

Outro avanço significativo refere-se à nanotecnologia baseada em DNA, que introduz conceitos inovadores como os bio-nanorrobôs. Abdollahzadeh, Peeples e Shahcheraghi (2025) apontam que esses sistemas possuem capacidade de reconhecimento molecular altamente específico, permitindo intervenções terapêuticas precisas em nível celular. Essa abordagem representa um marco no desenvolvimento de terapias personalizadas, ao possibilitar a atuação direta em alvos genéticos e moleculares.

A interface entre nanotecnologia e terapias epigenéticas também merece destaque. Ahmad *et al.* (2025) argumentam que o uso de nanossistemas para a entrega de moduladores epigenéticos permite uma liberação sustentada e direcionada, aumentando a eficácia terapêutica e reduzindo efeitos adversos. Essa estratégia é particularmente promissora no tratamento de neoplasias, nas quais alterações epigenéticas desempenham papel central na progressão da doença.

Além disso, a convergência entre nanotecnologia e outras abordagens terapêuticas inovadoras tem ampliado o escopo de aplicação dessas tecnologias. Smadja e Lellouch (2025) destacam que a combinação de nanotecnologia com células progenitoras e hipertermia representa uma fronteira promissora na oncologia de precisão, potencializando os efeitos terapêuticos e melhorando os

desfechos clínicos. De forma semelhante, Chattopadhyay *et al.* (2025) evidenciam que a integração entre nanotecnologia, medicina de precisão e inovações em sistemas de liberação de fármacos tem revolucionado o tratamento do câncer de mama.

Outro aspecto relevante refere-se ao avanço nos processos de síntese de nanomateriais, que têm se tornado cada vez mais sofisticados e controlados. Han *et al.* (2025) ressaltam que o desenvolvimento de sistemas inteligentes para síntese de nanomateriais inorgânicos contribui para a produção de estruturas mais eficientes e seguras. Paralelamente, Lai *et al.* (2025) demonstram que estratégias de entrega inteligente também têm sido aplicadas em áreas como a engenharia genética vegetal, evidenciando a versatilidade e o potencial interdisciplinar da nanotecnologia.

Dessa forma, a fundamentação teórica evidencia que a nanotecnologia aplicada à farmacologia não se limita à melhoria dos sistemas de liberação de fármacos, mas envolve uma transformação abrangente na forma como as terapias são concebidas, desenvolvidas e aplicadas. A integração entre sistemas inteligentes, abordagens moleculares e tecnologias emergentes reforça o papel central da nanotecnologia na consolidação de terapias de precisão, apontando para um futuro marcado por intervenções cada vez mais eficazes, seguras e personalizadas.

2 METODOLOGIA

Trata-se de um estudo de natureza qualitativa, do tipo revisão de literatura, com abordagem descritiva e caráter exploratório, desenvolvido com o objetivo de sintetizar e analisar criticamente as evidências científicas disponíveis acerca da nanotecnologia aplicada à farmacologia, com ênfase no desenvolvimento de fármacos para terapias de precisão.

A construção do estudo foi norteada pela seguinte pergunta de pesquisa: quais são os avanços da nanotecnologia aplicada à farmacologia no desenvolvimento de fármacos para terapias de precisão, considerando seus impactos na eficácia terapêutica, segurança e personalização do tratamento? Essa questão foi elaborada com base na estratégia PICO (População, Interesse e Contexto), permitindo direcionar a busca e a seleção dos estudos de forma sistematizada e coerente com o objetivo proposto.

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed, Scopus, MEDLINE e SciELO, reconhecidas pela relevância e abrangência na área das ciências da saúde. Foram incluídos artigos publicados no período de 2022 a 2026, com o intuito de garantir a atualidade das evidências analisadas. A seleção contemplou estudos disponíveis nos idiomas português e inglês, considerando a predominância dessas línguas na produção científica internacional.

Para a estratégia de busca, foram utilizados descritores controlados e não controlados, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR. Entre os principais descritores

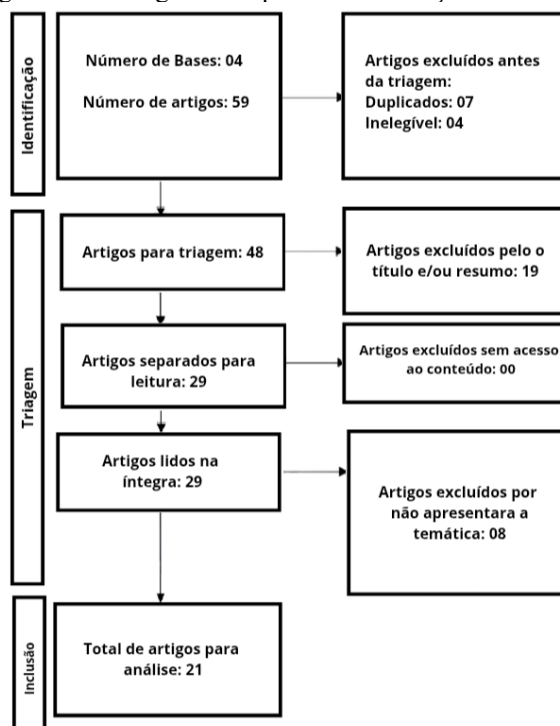
empregados, destacam-se: “nanotechnology”, “pharmacology”, “precision therapy”, “drug delivery systems”, “nanomedicine”, “targeted therapy”, “terapia de precisão”, “nanotecnologia” e “liberação controlada de fármacos”. As combinações foram adaptadas conforme as especificidades de cada base de dados, visando ampliar a sensibilidade e a especificidade da busca.

Foram estabelecidos critérios de inclusão que contemplaram: (i) artigos originais, revisões sistemáticas e revisões integrativas; (ii) estudos que abordassem diretamente a aplicação da nanotecnologia no desenvolvimento de fármacos ou sistemas de liberação para terapias de precisão; (iii) publicações disponíveis na íntegra; e (iv) estudos publicados no recorte temporal definido. Por outro lado, os critérios de exclusão incluíram: (i) artigos duplicados entre as bases de dados; (ii) estudos que não apresentassem relação direta com o tema proposto; (iii) publicações incompletas, resumos, editoriais, cartas ao editor e capítulos de livros; e (iv) estudos com dados insuficientes para análise.

O processo de seleção dos estudos ocorreu em etapas, iniciando-se pela leitura dos títulos e resumos, seguida da leitura na íntegra dos artigos potencialmente elegíveis. Posteriormente, realizou-se a análise crítica dos conteúdos, considerando a relevância, a qualidade metodológica e a contribuição para o tema investigado. Para organização e sistematização das informações, os estudos selecionados foram categorizados de acordo com aspectos como tipo de nanotecnologia empregada, aplicação terapêutica, mecanismos de ação e principais resultados.

A síntese dos dados foi realizada de forma descritiva e analítica, permitindo identificar tendências, avanços e lacunas na literatura científica. Para melhor visualização do processo de seleção dos estudos, elaborou-se um fluxograma baseado nas recomendações do modelo PRISMA, contemplando as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos artigos. A Figura 1 apresenta de forma esquemática o processo de busca e seleção dos estudos incluídos nesta revisão, contribuindo para a transparência metodológica e reprodutibilidade do estudo.

Figura 1 – Fluxograma do processo de seleção dos estudos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A síntese dos dados foi realizada de forma descritiva e analítica, permitindo identificar avanços, tendências e lacunas na literatura científica acerca da nanotecnologia aplicada à farmacologia. Por se tratar de uma revisão de literatura com utilização de dados secundários disponíveis publicamente, o estudo dispensa submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa, conforme as diretrizes vigentes.

3 RESULTADOS

A análise dos 21 estudos selecionados evidencia que a nanotecnologia aplicada à farmacologia tem promovido avanços substanciais no desenvolvimento de fármacos para terapias de precisão, especialmente no contexto oncológico. Observa-se uma predominância de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de sistemas de liberação inteligentes, capazes de aumentar a especificidade terapêutica e reduzir efeitos adversos. Nesse sentido, Adepu e Ramakrishna (2021) destacam que os sistemas de liberação controlada evoluíram significativamente, permitindo maior estabilidade e direcionamento dos fármacos, enquanto Wang, Zhao e Nie (2023) enfatizam o potencial dos nanomateriais inteligentes na superação de barreiras biológicas.

Os resultados demonstram que a utilização de nanopartículas como veículos terapêuticos possibilita intervenções mais eficazes em nível celular e molecular. López-Estévez *et al.* (2024) evidenciam que a entrega intracelular de anticorpos mediada por nanotecnologia representa uma

estratégia promissora para o tratamento de tumores com mutações específicas, como os associados ao gene KRAS. De forma complementar, Tantray *et al.* (2025) ressaltam a importância dos dispositivos biomédicos baseados em nanotecnologia tanto no diagnóstico quanto no monitoramento terapêutico, ampliando a precisão das intervenções clínicas.

Além disso, os estudos analisados apontam para a crescente utilização de estratégias terapêuticas combinadas mediadas por nanotecnologia. Chen *et al.* (2024) demonstram que a indução de ferroptose por meio de nanoplateformas tem potencial significativo no tratamento do câncer, enquanto Yang *et al.* (2024) destacam a regulação da autofagia como mecanismo relevante para superar a resistência tumoral. Em consonância, Yang *et al.* (2025) abordam a modulação da mitofagia como uma estratégia emergente que contribui para a regulação da homeostase celular e potencializa os efeitos terapêuticos.

A integração entre nanotecnologia e farmacogenômica também se destaca como um dos principais achados desta revisão. Tiwari *et al.* (2025) evidenciam que a aplicação de nanossistemas em terapias personalizadas permite ajustes mais precisos na administração de fármacos, considerando o perfil genético individual dos pacientes. Esse avanço reforça a importância da medicina de precisão, conforme apontado por Yadollahpour (2021), ao destacar o papel dos biomarcadores na definição de estratégias terapêuticas mais eficazes.

Outro aspecto relevante identificado nos estudos refere-se ao desenvolvimento de sistemas responsivos a estímulos. Kallepalli *et al.* (2025) ressaltam que esses sistemas são capazes de liberar fármacos de forma seletiva em resposta a condições específicas do microambiente tumoral, enquanto Li, Sun e Jiang (2024) destacam sua atuação na regulação do metabolismo tumoral. Esses avanços contribuem para maior eficiência terapêutica e redução de efeitos colaterais.

No que se refere à diversidade de aplicações, Cai *et al.* (2025) demonstram que a nanotecnologia tem sido amplamente utilizada no tratamento de osteossarcoma, evidenciando a versatilidade dos sistemas nanoestruturados. De forma semelhante, Chattopadhyay *et al.* (2025) destacam a integração entre nanotecnologia e terapias inovadoras no tratamento do câncer de mama, reforçando o caráter multidimensional dessas abordagens.

O Quadro 1 apresenta a síntese dos principais estudos incluídos, destacando autores, ano, tipo de nanotecnologia e principais aplicações terapêuticas.

Quadro 1 – Síntese dos estudos sobre nanotecnologia aplicada à farmacologia

Autor/Ano	Categoria	Aplicação principal	Principais achados
López-Estévez <i>et al.</i> (2024); Tiwari <i>et al.</i> (2025); Yadollahpour (2021)	Terapias direcionadas e de precisão	Entrega intracelular e personalização terapêutica	Evidenciam elevada especificidade molecular e maior assertividade terapêutica, com intervenções individualizadas baseadas no perfil genético
Tantray <i>et al.</i> (2025)	Dispositivos e diagnóstico nanotecnológico	Diagnóstico e monitoramento terapêutico	Demonstram integração eficiente entre diagnóstico precoce e intervenção terapêutica, favorecendo decisões clínicas mais precisas
Chen <i>et al.</i> (2024); Yang <i>et al.</i> (2024); Yang <i>et al.</i> (2025); Ninh <i>et al.</i> (2023)	Terapias combinadas e mecanismos celulares	Ferroptose, autofagia, mitofagia	Apontam ampliação da eficácia terapêutica por meio da modulação de vias celulares e superação de mecanismos de resistência tumoral
Adepu e Ramakrishna (2021); Kallepalli <i>et al.</i> (2025); Li, Sun e Jiang (2024)	Sistemas inteligentes de liberação	Liberação controlada e responsiva	Indicam maior controle espaço-temporal na liberação de fármacos, com aumento da seletividade e redução da toxicidade sistêmica
Chattopadhyay <i>et al.</i> (2025); Cai <i>et al.</i> (2025); Wang, Zhao e Nie (2023)	Aplicações oncológicas específicas	Câncer de mama e osteossarcoma	Revelam versatilidade terapêutica e melhoria significativa nos desfechos clínicos em diferentes tipos de neoplasias
Abdollahzadeh <i>et al.</i> (2025); Han <i>et al.</i> (2025); Lai <i>et al.</i> (2025)	Inovações em nanotecnologia	Nanorrobôs, síntese e engenharia genética	Evidenciam avanços em precisão molecular e desenvolvimento de tecnologias emergentes com alto potencial translacional
Zahra <i>et al.</i> (2024); Ma <i>et al.</i> (2024)	Sustentabilidade e segurança	Nanotecnologia verde e avaliação de riscos	Destacam a necessidade de equilíbrio entre inovação tecnológica, biocompatibilidade e segurança ambiental
Ahmad <i>et al.</i> (2025); Smadja e Lellouch (2025)	Terapias avançadas integradas	Terapia epigenética e hipertermia	Demonstram potencial sinérgico de abordagens combinadas, promovendo maior eficácia e otimização terapêutica

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados também evidenciam avanços em áreas emergentes, como a nanotecnologia baseada em DNA. Abdollahzadeh, Peeples e Shahcheraghi (2025) apontam que os bio-nanorrobôs representam uma inovação promissora para a entrega altamente específica de fármacos. Além disso,

Ahmad *et al.* (2025) destacam o potencial da nanotecnologia em terapias epigenéticas, permitindo liberação sustentada de moduladores de metilação do DNA.

A associação entre nanotecnologia e outras estratégias terapêuticas também se mostra relevante. Smadja e Lellouch (2025) evidenciam que a combinação com hipertermia e células progenitoras potencializa os efeitos terapêuticos, enquanto Ninh *et al.* (2023) ressaltam o papel das ferramentas computacionais na identificação de combinações sinérgicas de fármacos.

Outro achado importante refere-se ao avanço na síntese e desenvolvimento de nanomateriais. Han *et al.* (2025) destacam a utilização de sistemas inteligentes para a produção de nanomateriais inorgânicos, enquanto Lai *et al.* (2025) demonstram aplicações inovadoras na engenharia genética vegetal, evidenciando o caráter interdisciplinar da nanotecnologia. Ademais, Zahra, Abrahamse e George (2024) ressaltam a importância da nanotecnologia verde, voltada à sustentabilidade e à redução de impactos ambientais.

Entretanto, os estudos também apontam desafios relevantes. Ma *et al.* (2024) enfatizam preocupações relacionadas à segurança e aos riscos ambientais dos nanomateriais, indicando a necessidade de maior rigor na avaliação toxicológica e regulamentação dessas tecnologias.

O Quadro 2 apresenta as principais categorias temáticas identificadas nos estudos, incluindo avanços, aplicações e desafios da nanotecnologia na farmacologia.

Quadro 2 – Categorias temáticas dos estudos analisados

Categoria temática	Descrição	Autor/Ano
Sistemas de liberação controlada	Abrange tecnologias voltadas ao desenvolvimento de sistemas capazes de promover a liberação direcionada, controlada e sustentada de fármacos, otimizando a biodisponibilidade e minimizando efeitos adversos	Adepu e Ramakrishna (2021); Kallepalli <i>et al.</i> (2025); Li, Sun e Jiang (2024)
Terapias de precisão	Envolve estratégias terapêuticas baseadas na identificação de alvos moleculares e no perfil individual do paciente, permitindo intervenções mais específicas e eficazes	López-Estévez <i>et al.</i> (2024); Tiwari <i>et al.</i> (2025); Yadollahpour (2021)
Terapias combinadas	Refere-se à utilização integrada de múltiplas abordagens terapêuticas, potencializando efeitos sinérgicos e ampliando a eficácia do tratamento	Chen <i>et al.</i> (2024); Ninh <i>et al.</i> (2023); Smadja e Lellouch (2025)
Regulação de processos celulares	Compreende a modulação de mecanismos celulares fundamentais, como autofagia, mitofagia e metabolismo tumoral, visando interferir na progressão de doenças	Yang <i>et al.</i> (2024); Yang <i>et al.</i> (2025); Li, Sun e Jiang (2024)

Nanotecnologia epigenética	Engloba abordagens voltadas à modulação de mecanismos epigenéticos por meio de sistemas nanoestruturados, influenciando a expressão gênica e processos celulares associados	Ahmad <i>et al.</i> (2025)
Nanotecnologia em oncologia	Refere-se à aplicação de nanossistemas no diagnóstico, monitoramento e tratamento de diferentes tipos de câncer, com foco em maior precisão terapêutica	Chattopadhyay <i>et al.</i> (2025); Cai <i>et al.</i> (2025); Wang, Zhao e Nie (2023)
Inovação em materiais	Abrange o desenvolvimento, síntese e otimização de nanomateriais com propriedades físico-químicas avançadas, visando aplicações biomédicas mais eficientes	Han <i>et al.</i> (2025); Abdollahzadeh <i>et al.</i> (2025)
Sustentabilidade e nanotecnologia verde	Envolve o desenvolvimento de abordagens nanotecnológicas com foco na redução de impactos ambientais, aumento da biocompatibilidade e segurança dos sistemas terapêuticos	Zahra <i>et al.</i> (2024); Ma <i>et al.</i> (2024)
Aplicações interdisciplinares	Refere-se à expansão do uso da nanotecnologia para outras áreas do conhecimento, evidenciando seu caráter transversal e potencial inovador	Lai <i>et al.</i> (2025)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

De modo geral, os resultados evidenciam que a nanotecnologia tem desempenhado papel central na transformação da farmacologia moderna, promovendo o desenvolvimento de terapias mais eficazes, seguras e personalizadas. A convergência entre diferentes abordagens tecnológicas, aliada à crescente compreensão dos mecanismos moleculares das doenças, reforça o potencial da nanotecnologia como ferramenta estratégica na medicina de precisão.

4 DISCUSSÃO

A análise integrada dos estudos evidencia que a nanotecnologia aplicada à farmacologia tem promovido uma reconfiguração substancial das estratégias terapêuticas contemporâneas, especialmente no âmbito da medicina de precisão. Tal transformação não se limita ao aprimoramento de sistemas de liberação de fármacos, mas abrange a construção de plataformas terapêuticas multifuncionais, capazes de atuar simultaneamente em diferentes níveis biológicos. Nesse sentido, Yadollahpour (2021) ressalta que a incorporação de biomarcadores à nanotecnologia amplia a capacidade de estratificação dos pacientes, favorecendo intervenções mais direcionadas e eficientes, o que converge com os achados de Tiwari *et al.* (2025), ao destacarem o papel da farmacogenômica nanoassistida na personalização terapêutica.

Observa-se, portanto, uma convergência entre os autores quanto ao potencial da nanotecnologia em promover maior precisão terapêutica por meio da interação direta com alvos moleculares específicos. López-Estévez *et al.* (2024) evidenciam que a entrega intracelular de anticorpos mediada por nanossistemas representa um avanço significativo na abordagem de tumores com mutações específicas, enquanto Chattopadhyay *et al.* (2025) reforçam que a integração entre nanotecnologia e medicina de precisão tem revolucionado o tratamento oncológico, especialmente em neoplasias complexas como o câncer de mama. Essa concordância aponta para um cenário no qual a nanotecnologia não apenas potencializa a ação dos fármacos, mas redefine a lógica terapêutica baseada na individualização do tratamento.

Outro ponto de convergência relevante refere-se ao uso de sistemas inteligentes de liberação de fármacos. Adepu e Ramakrishna (2021) destacam que tais sistemas permitem maior controle sobre a biodistribuição e o tempo de ação dos medicamentos, enquanto Kallepalli *et al.* (2025) enfatizam a importância dos sistemas responsivos a estímulos na liberação seletiva de agentes terapêuticos. Em consonância, Li, Sun e Jiang (2024) apontam que esses sistemas também desempenham papel ativo na regulação do metabolismo tumoral, ampliando seu potencial terapêutico. Dessa forma, percebe-se que os avanços tecnológicos não apenas aprimoram a entrega de fármacos, mas também contribuem para a modulação de processos biológicos complexos.

A literatura também evidencia consenso quanto à eficácia das terapias combinadas mediadas por nanotecnologia. Chen *et al.* (2024) destacam a indução de ferroptose como uma estratégia promissora para a eliminação de células tumorais, enquanto Yang *et al.* (2024) e Yang *et al.* (2025) enfatizam a importância da regulação de processos como autofagia e mitofagia na superação da resistência tumoral. Esses achados são reforçados por Ninh *et al.* (2023), ao apontarem que a integração entre nanotecnologia e ferramentas computacionais possibilita a identificação de combinações terapêuticas mais eficazes. Assim, observa-se uma tendência crescente de abordagens terapêuticas multifatoriais, que visam atuar de forma simultânea em diferentes vias celulares.

Adicionalmente, a nanotecnologia tem ampliado suas aplicações ao incorporar estratégias inovadoras, como a terapia epigenética e o uso de nanorrobôs. Ahmad *et al.* (2025) argumentam que a entrega direcionada de moduladores epigenéticos permite maior controle sobre a expressão gênica, contribuindo para a reversão de processos patológicos. Paralelamente, Abdollahzadeh, Peeples e Shahcheraghi (2025) destacam que a nanotecnologia baseada em DNA representa um avanço significativo no desenvolvimento de sistemas altamente específicos e programáveis. Esses avanços indicam uma evolução no campo terapêutico, na qual a nanotecnologia assume um papel ativo na regulação de mecanismos biológicos fundamentais.

Outro aspecto importante refere-se à integração da nanotecnologia com abordagens terapêuticas complementares. Smadja e Lellouch (2025) evidenciam que a associação com técnicas como hipertermia e o uso de células progenitoras potencializa os efeitos terapêuticos, promovendo melhores desfechos clínicos. Essa perspectiva é corroborada por Tantray *et al.* (2025), ao destacarem que dispositivos biomédicos baseados em nanotecnologia têm contribuído significativamente para o monitoramento e a eficácia das intervenções terapêuticas. Dessa forma, a nanotecnologia se configura como uma plataforma integradora, capaz de potencializar diferentes modalidades terapêuticas.

No que tange ao desenvolvimento de novos materiais, Han *et al.* (2025) ressaltam os avanços nos sistemas inteligentes de síntese de nanomateriais, que permitem maior controle sobre suas propriedades físico-químicas. De modo semelhante, Wang, Zhao e Nie (2023) apontam que os nanomateriais inteligentes apresentam elevado potencial na superação de barreiras biológicas e na melhoria da eficácia terapêutica. Além disso, Lai *et al.* (2025) evidenciam o caráter interdisciplinar da nanotecnologia, ao demonstrarem sua aplicação em áreas como a engenharia genética, o que amplia ainda mais suas possibilidades de uso.

Entretanto, apesar dos avanços significativos, a literatura também aponta desafios importantes que precisam ser considerados. Ma *et al.* (2024) destacam preocupações relacionadas à toxicidade e aos impactos ambientais dos nanomateriais, indicando a necessidade de avaliações mais rigorosas quanto à segurança dessas tecnologias. Em consonância, Zahra, Abrahamse e George (2024) enfatizam a importância do desenvolvimento de abordagens sustentáveis, como a nanotecnologia verde, que busca conciliar inovação tecnológica com responsabilidade ambiental.

Diante desse panorama, torna-se evidente que a nanotecnologia aplicada à farmacologia representa um campo em constante evolução, caracterizado pela convergência de múltiplas áreas do conhecimento. Os estudos analisados demonstram concordância quanto ao seu potencial transformador, especialmente no que se refere à personalização das terapias, à melhoria da eficácia dos tratamentos e à redução de efeitos adversos. Contudo, também evidenciam a necessidade de avanços em aspectos relacionados à segurança, regulamentação e aplicabilidade clínica.

Assim, a discussão dos resultados reforça que a nanotecnologia não deve ser compreendida apenas como uma ferramenta tecnológica, mas como um elemento estruturante na transição para uma medicina mais precisa, integrada e eficiente, capaz de atender às demandas crescentes por tratamentos personalizados e de alta complexidade.

5 CONCLUSÃO

A presente revisão evidenciou que a nanotecnologia aplicada à farmacologia tem desempenhado papel fundamental no desenvolvimento de fármacos para terapias de precisão, especialmente ao possibilitar maior seletividade terapêutica, controle da liberação medicamentosa e redução da toxicidade sistêmica. A análise dos estudos demonstrou que a incorporação de nanossistemas ao planejamento farmacológico tem favorecido intervenções mais eficazes em nível celular e molecular, ampliando as possibilidades de tratamento de doenças complexas, sobretudo no campo da oncologia. Dessa forma, verificou-se que a nanotecnologia representa um avanço significativo na transformação dos modelos terapêuticos convencionais em abordagens mais individualizadas e eficientes.

Em resposta à pergunta norteadora deste estudo, conclui-se que os principais avanços da nanotecnologia aplicada à farmacologia no desenvolvimento de fármacos para terapias de precisão estão relacionados à criação de sistemas inteligentes de liberação, ao uso de biomarcadores para personalização terapêutica, à integração com a farmacogenômica e ao desenvolvimento de plataformas multifuncionais capazes de atuar em diferentes mecanismos biológicos simultaneamente. Esses recursos têm contribuído para aumentar a eficácia dos tratamentos, melhorar o monitoramento clínico e promover maior segurança ao paciente, consolidando a nanotecnologia como uma importante ferramenta para a medicina contemporânea.

Apesar dos benefícios identificados, a literatura também demonstra que persistem desafios relevantes para a consolidação dessas tecnologias na prática clínica. Questões relacionadas à biocompatibilidade, à toxicidade a longo prazo, aos impactos ambientais e à padronização regulatória ainda limitam a aplicação ampla de determinados nanomateriais em larga escala. Nesse contexto, torna-se essencial o fortalecimento de pesquisas interdisciplinares que integrem farmacologia, biotecnologia, engenharia de materiais e ciências médicas, a fim de garantir o desenvolvimento de terapias cada vez mais seguras, acessíveis e clinicamente viáveis.

Como perspectiva futura, sugere-se a realização de estudos clínicos multicêntricos voltados à avaliação da eficácia e segurança de sistemas nanoestruturados personalizados em diferentes perfis genéticos de pacientes, com o objetivo de aprofundar a compreensão sobre a interação entre nanotecnologia e medicina personalizada. Investigações dessa natureza poderão contribuir para a validação clínica dessas estratégias e para a ampliação do uso da nanotecnologia como componente central no desenvolvimento de terapias farmacológicas de alta precisão.

REFERÊNCIAS

- ABDOLIAHZADEH, H.; PEEPLES, T. L.; SHAHCHERAGHI, M. DNA nanotechnology in oligonucleotide drug delivery systems: prospects for bio-nanorobots in cancer treatment. *Advanced Drug Delivery Reviews*, v. 225, p. 115673, 2025.
- ADEPU, S.; RAMAKRISHNA, S. Controlled drug delivery systems: current status and future directions. *Molecules*, v. 26, n. 19, p. 5905, 2021.
- AHMAD, U. *et al.* Nanotechnology-driven epigenetic cancer therapy: precision delivery and sustained release of DNA methylation modulators. *Yale Journal of Biology and Medicine*, v. 98, n. 2, p. 227–235, 2025.
- CAI, J. *et al.* Intelligent nanomedicine systems utilizing diverse nanoparticles for osteosarcoma therapy: a review. *International Journal of Nanomedicine*, v. 20, p. 14115–14130, 2025.
- CHATTOPADHYAY, A. *et al.* Revolutionizing breast cancer therapeutics: intersecting frontiers of precision medicine, nanotechnology, and drug delivery innovations. *Current Treatment Options in Oncology*, v. 26, n. 9, p. 775–796, 2025.
- CHEN, S. *et al.* Advance on combination therapy strategies based on biomedical nanotechnology induced ferroptosis for cancer therapeutics. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, v. 176, p. 116904, 2024.
- HAN, C. *et al.* Intelligent systems for inorganic nanomaterial synthesis. *Nanomaterials*, v. 15, n. 8, p. 631, 2025.
- KALLEPALLI, B. *et al.* Intelligent drug delivery: pioneering stimuli-responsive systems to revolutionize disease management: an in-depth exploration. *Current Drug Delivery*, v. 22, n. 2, p. 195–214, 2025.
- LAI, C. M. *et al.* Nanotechnology strategies in plant genetic engineering: intelligent delivery and precision editing. *Plants*, v. 14, n. 23, p. 3625, 2025.
- LI, X.; SUN, T.; JIANG, C. Intelligent delivery systems in tumor metabolism regulation: exploring the path ahead. *Advanced Materials*, v. 36, n. 11, e2309582, 2024.
- LÓPEZ-ESTÉVEZ, A. M. *et al.* Nanotechnology-assisted intracellular delivery of antibody as a precision therapy approach for KRAS-driven tumors. *Journal of Controlled Release*, v. 373, p. 277–292, 2024.
- MA, X. *et al.* Nanotechnology in healthcare, and its safety and environmental risks. *Journal of Nanobiotechnology*, v. 22, n. 1, p. 715, 2024.
- NINH, T. T. K. *et al.* Application of computational screening tools and nanotechnology for enhanced drug synergism in cancer therapy. *Current Drug Delivery*, v. 20, n. 7, p. 1015–1029, 2023.

SMADJA, D. M.; LELLOUCH, A. G. A promising frontier in cancer therapy: combining endothelial colony forming cells, nanotechnology, and hyperthermia for precision oncology. *Stem Cell Reviews and Reports*, v. 21, n. 8, p. 2343–2347, 2025.

TANTRAY, J. *et al.* Nanotechnology-based biomedical devices in cancer diagnostics and therapy. *Medical Oncology*, v. 42, n. 2, p. 50, 2025.

TIWARI, R. *et al.* Nano-enabled pharmacogenomics: revolutionizing personalized drug therapy. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, v. 36, n. 7, p. 913–938, 2025.

WANG, J.; ZHAO, Y.; NIE, G. Intelligent nanomaterials for cancer therapy: recent progresses and future possibilities. *Medical Review*, v. 3, n. 4, p. 321–342, 2023.

YADOLLAHPOUR, A. Nanotechnology and biomarkers in precision medicine: advances and perspectives. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, v. 21, n. 14, p. 1199–1201, 2021.

YANG, C. *et al.* Nanoplatfom-mediated autophagy regulation and combined anti-tumor therapy for resistant tumors. *International Journal of Nanomedicine*, v. 19, p. 917–944, 2024.

YANG, H. *et al.* Nanotechnology-targeted modulation of mitophagy in cancer therapy: progress and challenges. *Acta Biomaterialia*, v. 204, p. 129–155, 2025.

ZAHRA, M.; ABRAHAMSE, H.; GEORGE, B. P. Green nanotech paradigm for enhancing sesquiterpene lactone therapeutics in cancer. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, v. 173, p. 116426, 2024.